

# 西双版纳热带植物园主要种植园区太阳辐射特征比较研究

张一平<sup>1</sup> 赵俊斌<sup>1 2</sup> 宋清海<sup>1 2</sup> 梁 志<sup>3</sup>

(1 中国科学院热带森林生态学重点实验室,西双版纳热带植物园 2 中国科学院研究生院 3 云南大学资源环境与地球科学学院)

**摘要:**利用 2008—2009 年间太阳辐射观测资料,分析了西双版纳热带植物园主要种植园区太阳辐射的变化特征,得出其变化及能量分配的相关规律。研究结果表明:在各植物园区,太阳辐射各分量均呈现单峰性变化,中午出现最大值;在具有高大树木、遮蔽较大的种植园区,太阳辐射各分量日总量与旷地的比值较小,在仅有低矮树木的百果园,其比值较大;西双版纳热带植物园植物种植园区,其形成的植物群落结构对太阳辐射的作用已经与原生林或次生林相当,具有明显林下辐射的特征,为植物园进行植物的迁地保护提供了较为原始的森林环境,减少植物的人为驯化,最大程度地保证原物种的遗传特征;不同园区辐射特征对植物迁地保护种植区域的选择提供了依据。

**关键词:** 太阳辐射;分配率;热带物种保存;西双版纳热带植物园

中图分类号: S718.51+2.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2010)04-0136-08

ZHANG Yi-ping<sup>1</sup>; ZHAO Jun-bin<sup>1 2</sup>; SONG Qing-hai<sup>1 2</sup>; LIANG Zhi<sup>3</sup>. **Characteristics of solar radiation in main tropical plantations in the Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, southwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2010) 32 (4) 136-143 [Ch, 32 ref.]

1 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun, Yunnan, 666303, P. R. China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P. R. China;

3 College of Resources & Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming, 650091, P. R. China.

Data of solar radiation from 2008 to 2009 of the main plantations in the Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, south western China, was used to reveal the radiation variation and energy distribution. The results showed that all components of the daily solar radiation reached a peak value at noon in all the plantations. Daily total radiation of the plantations with big trees was lower than that of open field, while the plantations with dwarf trees received more daily radiation. Compared with the local virgin or secondary forests, plantations in the Xishuangbanna Tropical Botanical Garden had similar effects on solar radiation, which showed typical radiation characteristics under forest. Therefore, our botanical garden can provide a relatively wild environment for *ex situ* conservation of plant species, with less domestication by humans. The radiation characteristics in different plantations can also provide guides for selection of the regions suitable for *ex situ* conservation of plant species.

**Key words** solar radiation; distribution ratio; tropical plant conservation; Xishuangbanna Tropical Botanical Garden

太阳辐射是森林植物生长过程中的重要影响因素之一。几十年来,有关热带森林的太阳辐射环境始终是研究的热点,而研究内容则主要体现在林内的辐射量、光质、光模型的建立以及辐射环境对植物

生理和生长过程的影响等方面。在森林辐射能量环境研究领域,自 1923 年 Burns 将其 11 年的观测结果在 *Ecology* 发表以来,国内外学者对不同森林群落的冠层和林内太阳辐射的总量、反射量、透射量和

收稿日期:2009-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(30670395)、中国科学院植物园与生物分类研究项目(KSCX2-YW-Z-004)、云南省自然科学基金项目(2004C0053M)。

第一作者:张一平,博士,研究员。主要研究方向:生态气候。电话:0871-5160904 Email: yipingzh@xtbg.ac.cn 地址:650223 云南省昆明市学府路 88 号西双版纳热带植物园昆明分部。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

吸收量特征,及其与群落冠层结构等的关系进行了研究<sup>[1-20]</sup>,但是研究主要集中在中高纬度的亚热带、温带森林。以森林为下垫面的太阳辐射分析中,对散射辐射方面研究较多,更多的集中在植物光合作用可以直接利用的光合有效辐射上。研究表明:由于多云天气下散射的光合有效辐射要比晴天下的大,所以植物在多云天气下能更好地吸收 $\text{CO}_2$ <sup>[21-22]</sup>;长白山红松(*Pinus koraiensis*)林冠层透射率的研究认为,林冠结构对于透射辐射有重要影响<sup>[18]</sup>;对长白山红松林内的光合有效辐射观测资料的分析表明:在生长季,林下的光合有效辐射具有较大的空间变异性<sup>[20]</sup>。张弥等<sup>[23]</sup>对长白山阔叶红松林的研究表明:若天空中有一定云层的覆盖,则对阔叶红松林碳的净吸收有明显的促进作用,散射辐射的增加可以提高光能利用率(light use efficiency, LUE)。而散射辐射只是太阳辐射中的一小部分,从总体上来看,对太阳辐射各分量的研究也相当有必要,但这方面的研究目前还不多。

在西双版纳地区,张一平等<sup>[24-25]</sup>和窦军霞等<sup>[26]</sup>曾对西双版纳热带次生林林窗区域的光照强度和日照时间进行了研究,并研究了西双版纳热带季节雨林太阳辐射的基本特征<sup>[27]</sup>,分析了热带季节雨林的太阳辐射分配特征和垂直变化特征<sup>[28]</sup>以及光合有效辐射特征<sup>[29]</sup>。但是,以往的研究主要是对热带季节雨林或次生林太阳辐射的收支开展研究,针对引种植物不同种植园区的太阳辐射的研究较少,而这方面研究将有利于引种植物栽培的有效管理。

中国科学院西双版纳热带植物园作为热带植物保存和热带植物迁地保护的大本营,承担着热带植物的收集和热带珍稀濒危植物的保护任务,从20世纪60年代开始,就进行了热带、亚热带植物物种的引种、收集和保存,特别是近年来热带植物引种、收集、保存工作更是大规模开展,现在已有10 000多种热带植物引种、栽培在西双版纳植物园。并且早期引种栽培的树木现已长成高大树木,形成了密闭的群落。由于热带森林具有多层结构,适合于引种植物需要的环境也是各不相同,要使引种植物能良好地生长,必须给与引种植物以适宜的生长环境,这就需要对不同种植园区的小气候环境开展研究。但是,在西双版纳热带植物园,对于各引种植物种植园区的小气候特征,特别是与引种植物生长息息相关的太阳辐射的观测、研究尚不充分。

本文利用在西双版纳热带植物园主要种植园区不同季节的短期小气候实际观测资料,分析了这些种植园区林内在引种植物群落影响下的太阳辐射特征及其变化规律,以此为引种植物栽种及其栽种地

选择提供依据,为热带植物在此进行迁地保护提供支持。

## 1 研究地概况

### 1.1 观测地概况

受大气环流、地理位置及地方气候的影响,地处热带北缘的西双版纳一年中有雾凉季(11月—翌年2月)、干热季(3—4月)和雨季(5—10月)之分,该地区雾日较多,年雾日数可达186.4 d。在雾凉季月平均雾日数超过23.0 d,最多1月可达26.1 d;一般22:00左右开始起雾,直到次日12:00后才逐渐消散;与雾凉季相比,干热季的雾生成时刻较迟,维持时间较短,一般23:00之后才开始起雾,而次日10:00左右就逐渐消散。

本研究选择了4个主要种植园区进行小气候观测。对照的旷地选择了中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站的勐仑气象站资料。

样地(1)为定植栽培、保存有多种珍稀濒危植物,森林结构为多层、多种的沟谷雨林,其森林除在20世纪60年代受到部分干扰之外,现保存有部分原始热带雨林。树木高度约在35 m。

样地(2)为20世纪80年代定植栽培、保存有热带典型植物龙脑香科(Dipterocarpaceae)植物的龙脑香人工林,树高约25 m;北侧较空旷。

样地(3)为在20世纪60年代就定植栽培有多种引种植物的树木园,郁闭度较高,西南侧有个林窗,植株株高约20~30 m,下垫面是枯枝落叶层,有少量幼苗。

样地(4)为20世纪80年代定植栽培多种经济植物的百果园,郁闭度低,光线容易直射或斜射到地面,株高约3~5 m,下垫面是草坪。

旷地设置在西双版纳热带植物园中的气象观测场中,下垫面为草地,上方没有任何植物遮蔽,其上布置有多种气候观测仪器,本研究主要选用其同期输出的辐射数据进行对比分析。

西双版纳热带植物园主要种植园区可分为两类,一类是已长成高大树木,具有较大遮蔽的种植园区(沟谷雨林、龙脑香林和树木园),其叶面积指数为3.43~5.01,以树木园的叶面积指数最大;另外一类则是种植低矮经济林木的种植园区(百果园),其叶面积指数相对较小(1.73)。

### 1.2 观测方法

在4个主要种植园区,选择具有代表性的样点,进行了短期的林下小气候观测,观测均采用小气候自动观测系统(CAMPBELL公司,美国)。其中,太阳辐射观测采用4分量净辐射观测仪(CNR1, Kipp

& Zonen, 美国), 安装高度距地面 1.0 m, 同时测定向下、向上短波辐射和向下、向上长波辐射, 进而得到净辐射和有效辐射。树木园由于仪器故障, 导致雨季的净辐射和有效辐射缺测。观测频率为 0.5 Hz, 观测数据由系统处理, 输出 30 min 平均值。

观测时间为 2008 年 8 月 14—25 日(雨季)、2008 年 12 月 23—29 日(雾凉季)、2009 年 3 月 22 日—4 月 5 日(干热季)。观测采用北京时间, 比地方时间提前 1 h 13 min。

叶面积指数使用 LAI-2000 (LI-COR 公司, 美国) 在 2008 年 8 月测定。

### 1.3 计算统计方法

利用 5 个观测地的辐射数据, 选取了晴好天气的数据, 分析了各种植园区的太阳辐射特征。

通常, 辐射平衡可以表示为<sup>[11, 30]</sup>:

$$R_n = (Q - Q_a) - I \quad (1)$$

有效辐射, 由式(2)计算:

$$I = Q_{LUR} - \delta Q_{LDR} \quad (2)$$

反射率  $r$  利用式(3)计算:

$$r = Q_a / Q \quad (3)$$

式(1)~(3)中:  $R_n$  为净辐射,  $Q$  为总辐射(本文中为林内总辐射),  $Q_a$  为反射辐射,  $I$  为有效辐射,  $Q_{LUR}$  为地表向外发出的长波辐射,  $\delta$  为灰体系数, 取 0.95,  $Q_{LDR}$  为大气逆辐射。

在分析中, 各种植园区的辐射与旷地(气象站)的辐射差异分析, 采用的是各种植园区与旷地的辐射值比值来进行; 辐射分配率为各辐射分量与总辐射的比值(%)。

## 2 结果与分析

### 2.1 太阳辐射日变化特征

图 1 给出了旷地不同季节的太阳辐射日变化特征, 可见: 在西双版纳热带植物园, 不同季节的太阳辐射各分量均呈现相似的变化规律, 均在中午时分出现最大值。但是雨季(图 1a)的太阳辐射各分量数值均较大; 而在雾凉季(图 1b)各分量的数值均较小。

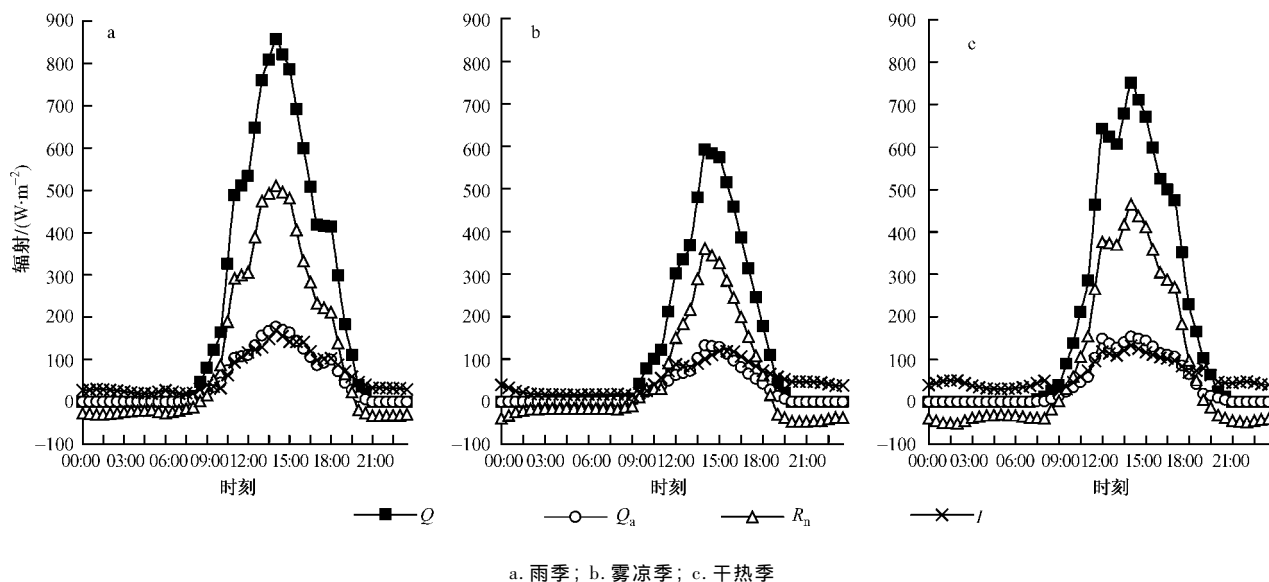


图 1 旷地不同季节的太阳辐射日变化

Fig. 1 Diurnal variation of solar radiation in different seasons at the open field

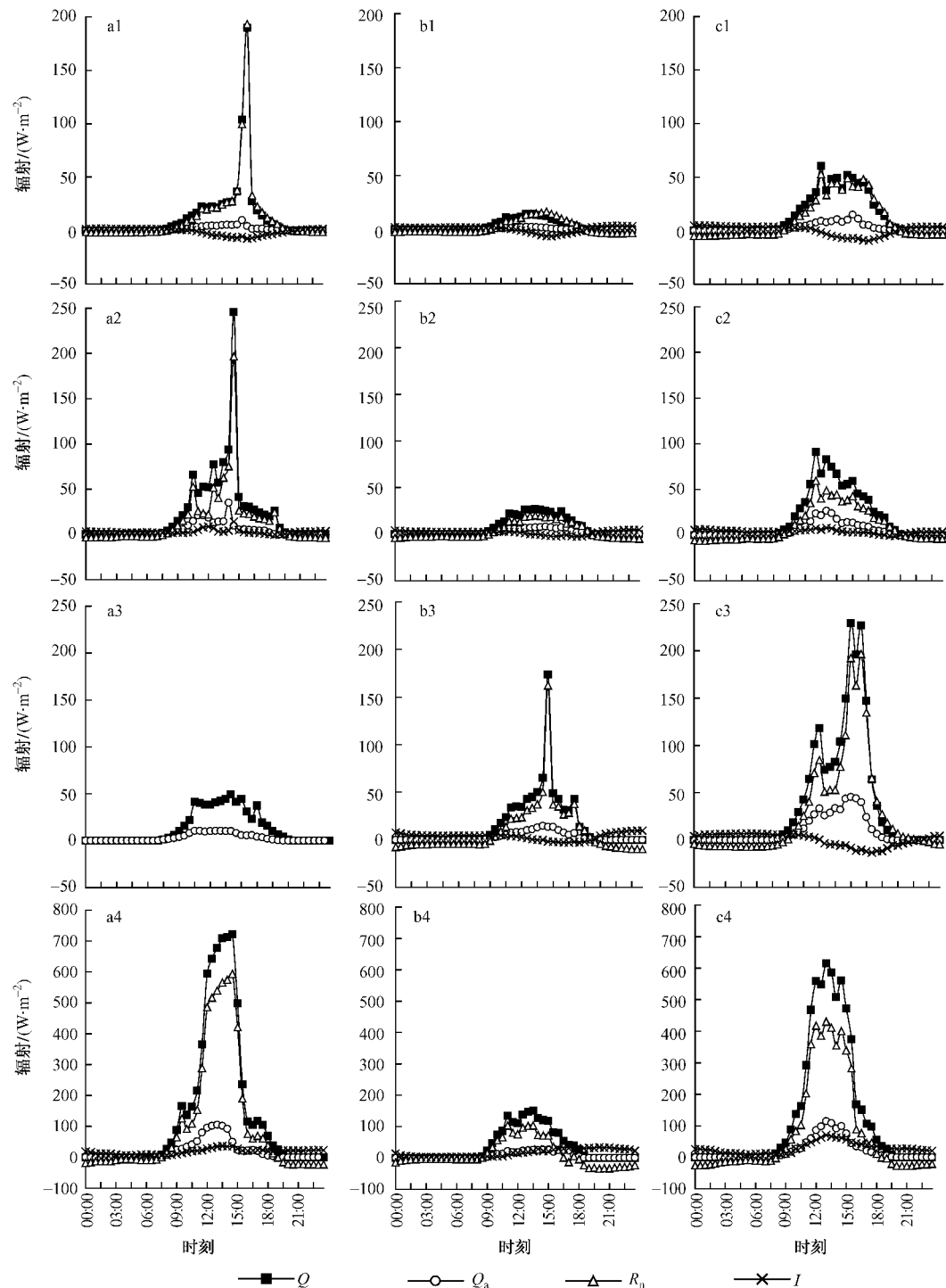
进一步分析日变化, 可以看出: 雨季(图 1a)太阳辐射各分量均在中午时分(14:00)出现最大值(总辐射  $856.8 \text{ W/m}^2$ , 净辐射  $510.6 \text{ W/m}^2$ , 反射辐射  $177.4 \text{ W/m}^2$ , 有效辐射  $168.8 \text{ W/m}^2$ )。另外, 净辐射上午由负值转为正值的时段为 08:00—08:30; 而傍晚由正值转为负值的时段在 19:30—20:00。

雾凉季(图 1b)各太阳辐射分量均较小, 总辐射、净辐射和反射辐射在中午时分(14:00)出现最大值( $591.8$ 、 $360.1$ 、 $131.9 \text{ W/m}^2$ ), 有效辐射则在 15:00 出现最大值( $118.9 \text{ W/m}^2$ )。净辐射上午由负值转为正值的时段为 09:00—09:30; 而傍晚由正值转为负值的时段在 19:00—19:30。

干热季(图 1c)太阳辐射各分量同样在中午时分(14:00)出现最大值(总辐射  $750.8 \text{ W/m}^2$ , 净辐射  $464.6 \text{ W/m}^2$ , 反射辐射  $153.2 \text{ W/m}^2$ , 有效辐射  $133.0 \text{ W/m}^2$ )。净辐射上午由负值转为正值的时段为 08:30—09:00; 而傍晚由正值转为负值的时段在 19:00—19:30。

而从不同季节各种植园区的太阳辐射的日变化(图 2)来看, 由于各种植园区不同的群落类型, 导致森林结构具有较大差异, 影响了太阳辐射的数值; 各种植园区太阳辐射各分量的数值均低于旷地; 且日变化规律受季节的影响较大。

雨季(图 2a), 在太阳高度角较高的中午, 太阳



a. 雨季; b. 雾凉季; c. 干热季; 1. 沟谷雨林; 2. 龙脑香林; 3. 树木园; 4. 百果园

图2 各种植园区不同季节的太阳辐射日变化

Fig. 2 Diurnal variation of solar radiation in different seasons at various tropical plantations

辐射可以穿过树冠层,导致中午时分,太阳辐射各分量均出现“突跃”现象,其中以沟谷雨林和龙脑香林太阳辐射“突跃”现象最为明显。这与在热带季节雨林、次生林林窗和林内的太阳辐射研究结果相似<sup>[24-25, 27]</sup>。在雾凉季(图2b),各种植园区的太阳辐射各分量的数值也较低;在树木园,由于受到西南侧林窗影响,在中午时分,出现了太阳辐射值“突跃”现象,总辐射和净辐射的数值可以增加若干倍。干

热季(图2c),由于受地方气候的影响,树木出现集中换叶,导致林冠较为稀疏,太阳辐射可以更多地透过树冠层到达地面,使得太阳辐射各分量的日变化较明显,总体上数值较大。

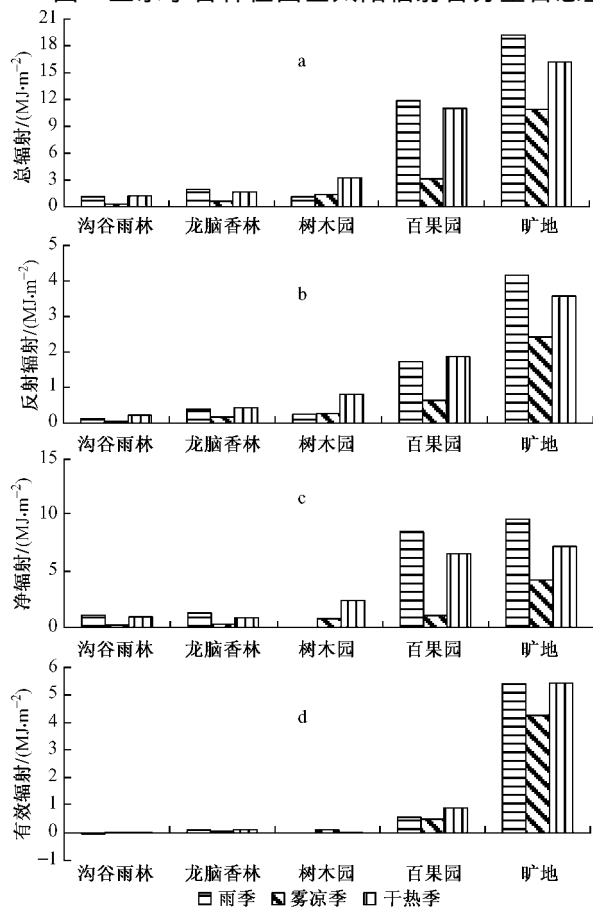
从图2还可以看出,树木遮蔽较小的百果园,各季节的太阳辐射各分量日变化趋近于旷地,数值均比其他种植园区大,但是,其最大值出现时刻与旷地有一定差异。

## 2.2 太阳辐射日总量特征

图3显示了太阳辐射各分量不同季节的平均日总量。可见,太阳辐射各分量的日总量同样呈现旷地的数值最高、百果园次之、沟谷雨林最小。具有明显的季节变化:雨季的太阳辐射最强,干热季居中,雾凉季最弱。从太阳辐射日总量来看,旷地的总辐射为 $10.90 \sim 19.21 \text{ MJ/m}^2$ ,反射辐射为 $2.42 \sim 4.15 \text{ MJ/m}^2$ ,净辐射 $4.22 \sim 7.21 \text{ MJ/m}^2$ ,有效辐射为 $4.26 \sim 5.43 \text{ MJ/m}^2$ ;在具有高大树木、遮蔽较大的种植园区,其太阳辐射日总量较小,总辐射为 $0.30 \sim 3.27 \text{ MJ/m}^2$ ,反射辐射为 $0.05 \sim 0.82 \text{ MJ/m}^2$ ,净辐射为 $0.20 \sim 2.41 \text{ MJ/m}^2$ ,有效辐射为 $-0.03 \sim 0.12 \text{ MJ/m}^2$ ;其中值得注意的是,沟谷雨林雨季的有效辐射日总量为负值( $-0.03 \text{ MJ/m}^2$ ),显示了热量从大气传向地面。在遮蔽较小的种植园区,太阳辐射日总量则居中;总辐射为 $3.10 \sim 11.86 \text{ MJ/m}^2$ ,反射辐射为 $0.64 \sim 1.88 \text{ MJ/m}^2$ ,净辐射为 $1.07 \sim 8.53 \text{ MJ/m}^2$ ,有效辐射为 $0.50 \sim 0.91 \text{ MJ/m}^2$ 。

## 2.3 太阳辐射各分量分配率特征

图4显示了各种种植园区太阳辐射各分量日总量的

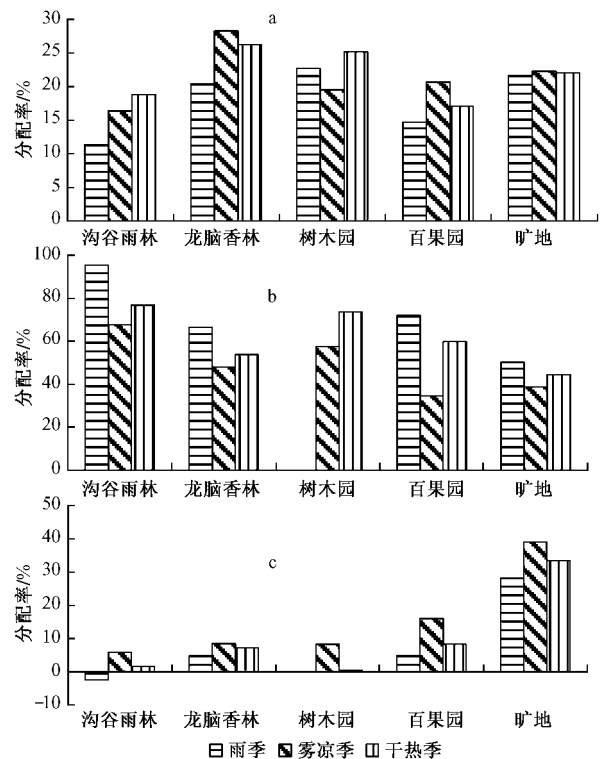


a. 总辐射; b. 反射辐射; c. 净辐射; d. 有效辐射

图3 各种种植园区和旷地的太阳辐射各分量的平均日总量

Fig. 3 Daily solar radiation in different seasons at various tropical plantations and open field

的分配率。可见,反射辐射分配率(图4a)在旷地的季节差异较小( $21.6\% \sim 22.2\%$ );而在不同种植园区,反射辐射分配率的季节变化差异较大,呈现出不同的变化特征:沟谷雨林干热季反射辐射分配率最大( $18.8\%$ );雨季最小( $11.4\%$ );龙脑香林雾凉季反射辐射分配率最大( $28.2\%$ ),雨季最小( $20.3\%$ );树木园则是干热季反射辐射分配率最大( $25.1\%$ ),雾凉季最小( $19.5\%$ );百果园雾凉季反射辐射分配率最大( $20.6\%$ ),雨季最小( $14.7\%$ )。



a. 反射辐射; b. 净辐射; c. 有效辐射

图4 各种种植园区太阳辐射各分量日总量的分配率

Fig. 4 Ratio of radiation components to total radiation at various tropical plantations

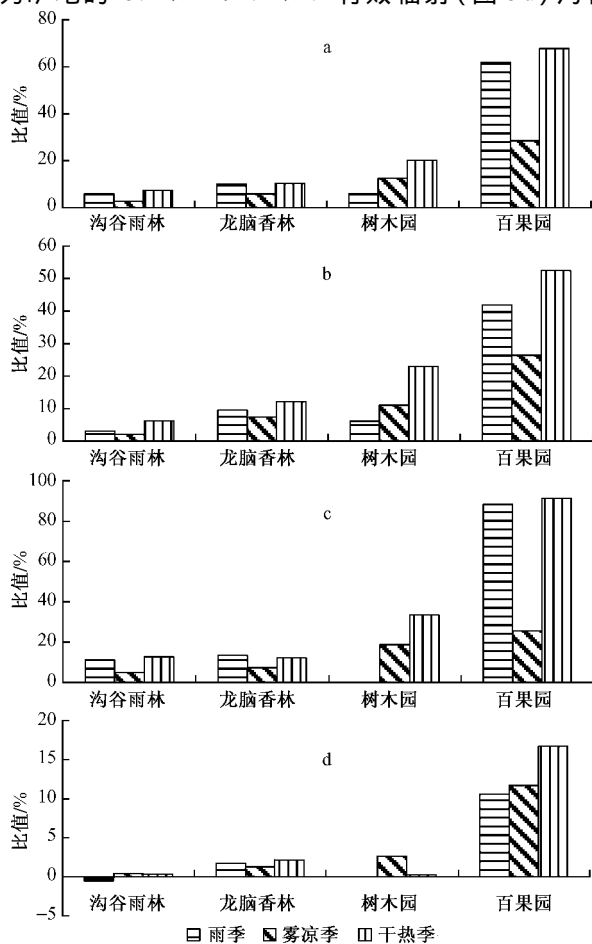
从净辐射分配率(图4b)来看,各种种植园区和旷地的净辐射分配率基本上呈现雨季最大,雾凉季最小的变化趋势;旷地的净辐射分配率与各种种植园区相比,数值相对较小,其中以雨季最大( $50.3\%$ ),雾凉季最小( $38.7\%$ )。各种种植园区净辐射分配率差异较大。沟谷雨林雨季的净辐射分配率高达 $95.4\%$ ,最小的雾凉季也达 $67.6\%$ ;龙脑香林的净辐射分配率在 $66.4\%$ (雨季)~ $53.8\%$ (雾凉季)变化;树木园由于雨季缺测,净辐射分配率最大值不明,雾凉季的净辐射分配率为 $57.6\%$ ;百果园雨季的分配率为 $71.9\%$ ,雾凉季为 $34.6\%$ 。

有效辐射的分配率也具有区域差异和季节差异(图4c),总体上呈现雾凉季有效辐射分配率最大,雨季最小。旷地的各季节的有效辐射分配率在雾凉季为 $39.0\%$ ,雨季为 $28.1\%$ ,均远大于各种种植园区。

沟谷雨林的有效辐射分配率在  $-2.4\% \sim 5.7\%$  变化;龙脑香林有效辐射分配率则为  $4.8\% \sim 8.5\%$ ;树木园有效辐射分配率(雨季缺测)的变化为  $0.4\% \sim 8.2\%$ ;百果园有效辐射分配率相对较大( $4.8\% \sim 16.0\%$ )。

#### 2.4 各种种植园区太阳辐射与旷地的比较

不同季节各种种植园区的太阳辐射各分量日总量与旷地的比值见图5,可见,不同的种植园区,太阳辐射各分量与旷地的比值具有较大差异。沟谷雨林的比值均较小,而百花园的比值均较大;总辐射(图5a)沟谷雨林仅为旷地的  $2.8\% \sim 7.4\%$ ;龙脑香林为旷地的  $5.8\% \sim 10.1\%$ ;树木园为旷地的  $5.9\% \sim 20.2\%$ ;百果园为旷地的  $28.5\% \sim 67.8\%$ 。反射辐射(图5b)沟谷雨林仅为旷地的  $2.0\% \sim 6.3\%$ ;龙脑香林为旷地的  $7.4\% \sim 12.2\%$ ;树木园为旷地的  $6.2\% \sim 23.0\%$ ;百果园为旷地的  $26.5\% \sim 52.5\%$ 。净辐射(图5c)沟谷雨林仅为旷地的  $4.8\% \sim 12.8\%$ ;龙脑香林为旷地的  $7.2\% \sim 13.4\%$ ;树木园为旷地的  $18.7\% \sim 33.4\%$ ;百果园为旷地的  $25.4\% \sim 91.4\%$ 。有效辐射(图5d)沟谷



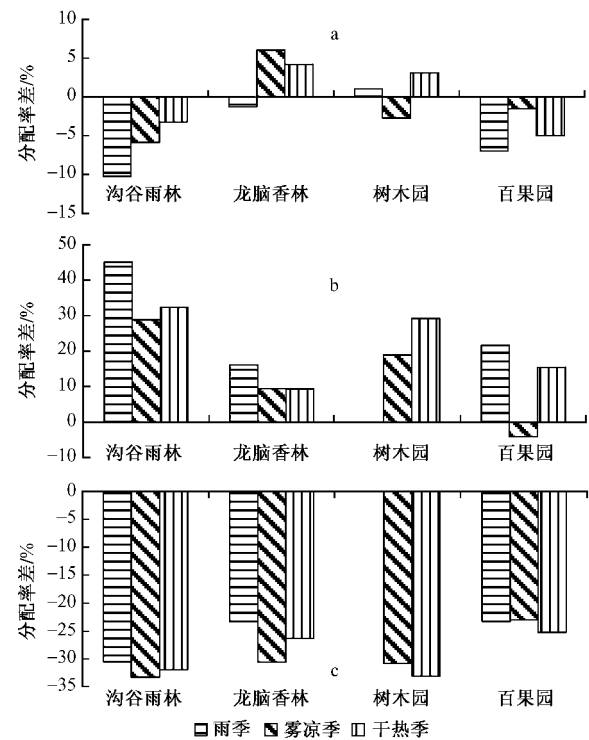
a. 总辐射; b. 反射辐射; c. 净辐射; d. 有效辐射

图5 各种种植园区太阳辐射各分量日总量与旷地的比值

Fig. 5 Ratio of solar radiation between tropical plantation and open field

雨林仅为旷地的  $-0.5\% \sim 0.4\%$ ;龙脑香林为旷地的  $1.3\% \sim 2.2\%$ ;树木园为旷地的  $0.3\% \sim 2.6\%$ ;百果园为旷地的  $10.6\% \sim 16.7\%$ 。

进一步比较各种种植园区与旷地的太阳辐射分配率的差异(图6),可见,各种种植园区的反射辐射分配率差异显著,并且季节变化明显(图6a)。沟谷雨林各季节的反射辐射分配率均小于旷地,差异较大( $-10.2\% \sim -3.3\%$ )。而龙脑香林在雾凉季和干热季,其反射辐射分配率高于旷地,差值为正( $6.0\%、4.2\%$ );雨季则略低于旷地( $-1.3\%$ )。树木园的反射辐射分配率与旷地的差异相对较小( $-2.7\% \sim 3.1\%$ )。百果园的反射辐射分配率同样低于旷地( $-6.9\% \sim -1.6\%$ )。



a. 反射辐射; b. 净辐射; c. 有效辐射

图6 各种种植园区太阳辐射各分量分配率与旷地的差值

Fig. 6 Deviation of solar radiation ratio between tropical plantation and open field

对于净辐射分配率(图6b),各种种植园区不同季节大多数高于旷地,同样具有季节变化。沟谷雨林净辐射分配率的差异最为显著,雨季差异达  $45.1\%$ ,雾凉季和干热季也具有较大差值( $28.9\%、32.4\%$ )。龙脑香林的净辐射分配率差异相对较小,季节变化也不大( $9.3\% \sim 16.1\%$ )。树木园的净辐射分配率与旷地的差值雾凉季为  $18.9\%$ ,干热季为  $29.2\%$ 。百果园净辐射分配率与旷地的差值的季节变化最大,雨季和干热季的差值为正( $21.6\%、15.5\%$ );雾凉季差值为负( $-4.1\%$ )。

各种种植园区有效辐射分配率与旷地的差异均为

负值(图6c),并且具有较大数值,但是季节差异和不同种植园区间的差异相对较小。沟谷雨林有效辐射分配率差异绝对值最大( $-33.3\% \sim -30.5\%$ ),而百果园差异绝对值最小( $-25.3\% \sim -23.0\%$ )。龙脑香林和树木园的差值介于其中。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 太阳辐射的时间分布特征

西双版纳热带植物园区域的太阳辐射具有明显的季节变化(图1、3),其辐射特征呈现雨季较大,雾凉季较小的分布特征。在雨季较强太阳辐射,可以提供充分的光资源,有利于植物的生长;而处于干旱少雨的雾凉季,较少的太阳辐射不利于植物的耗水蒸发等,同样有利于植物度过干季。

太阳辐射受到各种种植园区植物群落结构特征影响较大,在种植有高大乔木,并已经形成密闭群落的种植园区(沟谷雨林、龙脑香林和树木园)(图2),其太阳辐射特征具有了热带季节雨林和次生林林内、林窗的相似的分布特征<sup>[24-29]</sup>,数值较小;在中午时分,太阳总辐射会出现“突跃”现象。而在仅有低矮树木的百果园,其太阳辐射与旷地有较多相似性,数值较高,仅仅在早晚受到树木遮挡,使得太阳辐射降低。在树木集中换叶的干热季,各种种植园区太阳辐射的数值均有增加。特别是在树木园,由于多为高大树木,结构较为单一,所以在树木集中换叶时,林冠密度降低,导致地面附近的太阳辐射数值增加显著。各种种植园区不同季节的太阳辐射日总量同样具有显著差异(图3),具有高大树木的种植园区(沟谷雨林、龙脑香林和树木园),各太阳辐射分量的日总量远远低于旷地,特别是沟谷雨林的有效辐射在雨季为负值,显示了大气的热量传向地面;而种植较低矮的树木种植园区(百果园),太阳辐射各分量的日总量与旷地更为接近。

比较各种种植园区太阳辐射与旷地的差异(图5),可以看出:在栽培有高大树木,并且树木结构密闭较好的沟谷雨林、龙脑香林和树木园,太阳总辐射日总量不足旷地的20%,与热带季节雨林的透射率相似<sup>[27]</sup>,反射辐射不足23%,净辐射不足34%,有效辐射不足3%,特别是具有多层植物结构的沟谷雨林,太阳辐射各分量数值最小。而百果园比值较高,在干热季,百果园的净辐射可达旷地的91.4%。

以上研究表明:在不同季节中,各种种植园区的太阳辐射各分量的数值和时间变化均有区别,雾凉季天气状况比较稳定,导致太阳辐射时间变率较小;而热带雨季,阵性对流天气较多,致使太阳辐射时间变率较大,甚至在中午出现“突跃”现象;特别是在

干热季,由于热带森林处于集中换叶期,林相变化较大,使得太阳辐射各分量的日变化较明显。研究表明,西双版纳地区,太阳辐射对植物的光合作用和森林小气候的形成等起着重要作用<sup>[31-32]</sup>。在西双版纳热带植物园,主要种植园区的各热力要素在中午变化较大,且干热季的变化幅度明显大于雾凉季;在热带森林中,存在复杂、多样的热力作用和热力传递,导致森林中热力效应趋于多样化等,这都与太阳辐射分配的多样化有着不可分割的联系。

另外,研究结果还表明:在西双版纳热带植物园,伴随引种植物成长,不同的种植园区由于植物群落结构的差异,导致了不同种植园区太阳辐射具有不同的时间变化特征。在由高大树木形成的具有群落结构特征的种植园区,树木对太阳辐射的作用已经与当地的原生林或次生林相当,具有了明显的林下辐射特征,数值较低,时间变化较小。而在仅有低矮树木的种植园区,其太阳辐射数值和时间变化仍接近旷地。

#### 3.2 太阳辐射各分量分配率特征

各种种植园区太阳辐射各分量的分配率(图4)显示了在各种种植园区、不同太阳辐射分量间,分配率数值差异较大;相同的太阳辐射分量,太阳辐射分配率的数值差异较小,而季节之间的差异最小。在具有高大树木的种植园区,总辐射分配给净辐射的比率最大( $48.1\% \sim 95.4\%$ );分配给有效辐射的比率最小( $-2.4\% \sim 8.5\%$ );分配给反射辐射的比率居中( $11.4\% \sim 28.2\%$ ),其结果与西双版纳热带季节雨林林内的分配特征相似<sup>[27-28]</sup>。但是对于旷地,总辐射分配给各辐射分量间的分配率差异远小于具有高大树木的种植园区,净辐射分配率为 $38.7\% \sim 52.3\%$ ,有效辐射为 $28.1\% \sim 39.0\%$ ,反射辐射为 $21.6\% \sim 22.2\%$ 。对于具有低矮树木的种植园区,其分配率介于两者之间。由此看来,在具有高大树木的种植园区,所获得的太阳辐射主要用于下垫面的热量平衡支出。

#### 3.3 结 论

通过以上的分析研究,可以得出如下结果:

1)在西双版纳热带植物园区域,太阳辐射各分量均呈现单峰性变化特征,在中午时分出现最大值。从太阳辐射日总量来看,总辐射为 $10.90 \sim 19.21 \text{ MJ/m}^2$ ,反射辐射为 $2.42 \sim 4.15 \text{ MJ/m}^2$ ,净辐射为 $4.22 \sim 7.21 \text{ MJ/m}^2$ ,有效辐射为 $4.26 \sim 5.43 \text{ MJ/m}^2$ 。

2)与旷地相比,在具有高大树木、遮蔽较大的种植园区(树木园、沟谷雨林与龙脑香园),太阳辐射各分量日总量与旷地的比值较小,在仅有低矮树

木的百果园,其比值较大。

3)在西双版纳热带植物园,伴随引种植物成长,不同的种植园区,由于树木构成的植物群落结构的差异,导致了不同种植园区太阳辐射具有不同的数值和时空变化特征。在具有高大树木形成的森林群落,其结构特征对太阳辐射的作用已经与当地的原生林或次生林相当,具有了明显林下辐射的特征,数值较低,时间变化较小。在这些园区进行植物的迁地保护,可以保证迁地植物有一个较为原始的森林环境,从而减少植物异地生长过程中的人为驯化作用,以最大程度地保证原物种遗传特征;另外,不同园区辐射特征的揭示,对不同光适应特征的植物迁地保护种植区域提供了选择的依据。

致谢 本研究得到中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站的支持,提供了气象站的相关数据。宋富强、谭正洪、高富、张明达、姚玉刚、张会宁、李志恒、高进波等参加了野外观测。中国科学院西双版纳热带植物园的朱华先生和郑征先生提供了相关的植物种名,在此一并表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] OLSON C E, GOOD R E. Seasonal change in light reflectance from forest vegetation[J]. *Photogramm Engin*, 1961, 27: 492—493.
- [2] FEDERER C H, TANNER C B. The spectral distribution of light in the forest[J]. *Ecology*, 1963, 47: 555—560.
- [3] GATES D M, TANTRAPON W. The reflectivity of deciduous trees and herbaceous plants in the infrared to 25 microns [J]. *Science*, 1965, 115: 613—616.
- [4] LANDSBERG J J, JARVIS P G, SLATER M B. The radiation regime of a spruce forest[M]// *Plant response to climatic factors: Proceedings of the Uppsala Symposium*. Paris: UNESCO, 1973.
- [5] WILLIAM E R. The forest energy balance [J]. *International Review of Forestry Research*, 1967, 2: 127—179.
- [6] 崔启武, 朱劲伟. 林冠结构和光分布——光的透射和反射理论[J]. *地理学报*, 1981, 36(2): 196—208.
- [7] 朱劲伟, 崔启武. 林冠的结构和光分布——光的吸收理论的探讨[J]. *林业科学*, 1982, 18(3): 258—265.
- [8] 肖文发. 油松林的能量平衡[J]. *生态学报*, 1992, 12(1): 16—24.
- [9] 周国逸, 康文星. 杉木人工林能量平衡研究[J]. *东北林业大学学报*, 1990, 18(1): 14—22.
- [10] 张祝平. 鼎湖山森林群落的光能利用效率[J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1990, 14(2): 139—150.
- [11] 贺庆棠. 中国森林气象学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 40—41.
- [12] 康文星, 盛利元, 彭元英. 杉木人工林辐射与能量平衡的研究[M]//林业部科技司. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994: 53—62.
- [13] 孙雪峰, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林辐射能量环境初步研究[J]. *生态学报*, 1995, 15(3): 278—286.
- [14] 任海, 彭少麟, 张祝平, 等. 鼎湖山季风长绿阔叶林林冠结构与冠层辐射研究[J]. *生态学报*, 1996, 16(2): 174—179.
- [15] 任海, 彭少麟. 鹤山人工林的辐射能环境研究[J]. *生态科学*, 1997, 16(1): 22—29.
- [16] 刘志刚, 马钦彦, 潘向丽, 等. 华北落叶松放叶过程中的辐射特征[J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 519—524.
- [17] 金昌杰, 关德新, 朱廷曜. 长白山阔叶红松林太阳辐射分光谱特征[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 19—21.
- [18] 关德新, 金明淑, 徐浩. 长白山阔叶红松林生长季反射率特征[J]. *应用生态学报*, 2001, 13(2): 1544—1546.
- [19] 高西宁, 陶向新, 关德新. 长白山阔叶红松林热量平衡和蒸散的研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2002, 33(5): 331—334.
- [20] 袁凤辉, 关德新, 吴家兵, 等. 长白山红松针阔叶混交林林下光合有效辐射的基本特征[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 231—237.
- [21] MIN Q L. Impacts of aerosols and clouds on forest-atmosphere carbon exchange [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2005, 110: 1—12.
- [22] JOHNSON D M, SMITH W K. Low clouds and cloud immersion enhance photosynthesis in understory species of a southern Appalachian spruce-fir forest (USA) [J]. *American Journal of Botany*, 2006, 93(11): 1625—1632.
- [23] 张弥, 于贵瑞, 张雷明, 等. 太阳辐射对长白山阔叶红松林净生态系统碳交换的影响[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 270—282.
- [24] 张一平, 王进欣, 刘玉洪, 等. 西双版纳热带次生林林窗光照时空分布特征[J]. *南京林业大学学报*, 2001, 25(1): 13—17.
- [25] 张一平, 窦军霞, 刘玉洪, 等. 热带季节雨林林窗辐射特征研究[J]. *应用生态学报*, 2004a, 15(6): 929—934.
- [26] 窦军霞, 张一平, 刘玉洪, 等. 西双版纳热带次生林林窗辐射特征初步研究[J]. *热带气象学报*, 2005, 21(3): 293—300.
- [27] 张一平, 窦军霞, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林太阳辐射特征研究[J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(5): 17—25.
- [28] 窦军霞, 张一平, 赵双菊, 等. 西双版纳热带季节雨林辐射垂直分布特征[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(2): 15—21.
- [29] DOU J X, ZHANG Y P, FENG Z W, et al. Variations in photosynthetic photon flux density within a tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, southwestern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(6): 966—969.
- [30] 傅抱璞, 翁笃鸣, 虞静明, 等. 小气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 318—319.
- [31] 宋清海, 张一平, 郑征, 等. 热带季节雨林冠层树种绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*)光合生理生态特性研究[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(6): 961—966.
- [32] 张一平, 赵双菊, 窦军霞, 等. 西双版纳热带季节雨林热力效应时空分布特征初探[J]. *北京林业大学学报*, 2004, 26(4): 1—7.

(责任编辑 赵 勃)